

基于动态互利鹈鹕算法的配电网调度优化

董海¹, 魏代宇²

(1. 沈阳大学应用技术学院, 辽宁 沈阳 110041; 2. 沈阳大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110041)

摘要: 针对传统优化算法在求解有源配电网最优无功调度时较难寻找可行解或最优解的问题, 提出一种无功调度多目标优化方法, 提升算法求解精度, 降低功率损失。以功率平衡方程为等式约束条件, 采用母线和馈线的传输容量等作为不等式约束条件, 以有功损耗、总电压变化和无功总投资最小化为目标, 建立无功调度模型; 提出一种动态互利鹈鹕优化算法, 引入共生生物搜索算法的互利阶段, 促进鹈鹕之间的沟通交流, 平衡鹈鹕优化算法的探索和开发阶段, 利用动态加权技术, 增强算法的探索和收敛能力; 以 IEEE 69 节点系统为例, 将动态互利鹈鹕优化算法与其他 3 种算法进行对比。研究结果表明, 所提算法能够获得分布均匀、广泛覆盖的帕累托最优解集, 提升电力系统的稳定性。研究结论为有源配电网的高效、稳定与经济运行提供有效的优化工具和决策参考。

关键词: 分布式电源; 配电网; 无功调度; 鹈鹕优化算法; 多目标无功优化; 动态加权

中图分类号: TM734

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2026)01-0107-08

Scheduling optimization of distribution network based on dynamic mutualism pelican optimization algorithm

DONG Hai¹, WEI Daiyu²

(1. College of Applied Technology, Shenyang University, Shenyang 110041, China;

2. College of Mechanical Engineering, Shenyang University, Shenyang 110041, China)

Abstract: To address the difficulty in finding feasible or optimal solutions to the optimal reactive power dispatch problem in active distribution networks using traditional optimization algorithms, this paper proposes a multi-objective optimization method for reactive power dispatch to improve solution accuracy and reduce power losses. With the power balance equations as the equality constraints and the transmission capacities of buses and feeders' capacities as the inequality constraints, a reactive power dispatch model is established, which aims to minimize active power losses, total voltage deviation, and total reactive power investment. A dynamic mutualism pelican optimization algorithm is proposed. This algorithm introduces a mutualistic phase from the symbiotic organisms search algorithm to facilitate communication between pelicans, balancing the exploration and exploitation phases of the pelican optimization algorithm. The dynamic weighting technique is employed to enhance the algorithm's exploration and convergence capabilities. Using the IEEE 69-node system as a case study, the proposed dynamic mutualism pelican optimization algorithm is compared with three other algorithms. The results show that the proposed algorithm achieves a well-distributed and broad Pareto front, contributing to improved power system stability. The research conclusion provides an effective optimization tool and decision-making reference for the efficient, stable and economical operation of active distribution networks.

Keywords: distributed power supply; distribution network; reactive power scheduling; pelican optimization algorithm; multi-objective reactive power optimization; dynamic weighting

收稿日期: 2025-07-16 修回日期: 2025-08-29 接受日期: 2025-09-12 责任编辑: 张雯

基金项目: 国家自然科学基金项目(71672117); 中央引导地方科技发展计划资助项目(2021JH6/10500149)

作者简介: 董海(1971-), 男, 山东淄博人, 博士, 教授, 主要从事网络化协同设计与制造、流程优化与控制、系统工程等方面的研究。E-mail: donghaizh@163.com

0 引言

分布式发电技术包括光伏发电、风能发电、生物质能发电、燃气轮机及潮汐能发电等形式,其规模化发展推动了新能源的并网应用^[1]。然而,大规模风电与光伏的并网接入,易显著增加配电网节点电压的不稳定性与波动幅度^[2]。在配电网的适当位置配置合理容量的无功补偿设备,对其进行控制和调度,可有效改善新能源并网造成的电压越限问题^[3]。因此,对配电网进行无功优化可切实改善复杂配电网的电压分布情况。

学者针对配电网优化调度展开了大量研究。QIAN等^[4]提出具有自适应调整步长因子的改进型混合甲虫天线搜索算法,成功求解非线性多目标最优有功功率调度问题。王秀茹等^[5]结合前推回代算法和近似拟合法,提出一种考虑分布式能源的配电网无功调度和储能优化分析方法,提升了求解速度。董海等^[6]针对混合能源微电网动态调度优化问题,提出融合多模式调度策略和调度激励的策略驱动优化调度方法,以实现储能单元与外部电网功率互补,优化电源出力。武晓滕等^[7]提出基于多场景法的有源配电网动态无功优化方案,采用新冠病毒群体免疫算法对网损进行控制,有效降低运行成本。姜惠兰等^[8]构建运行成本最小的交直流配电网有功-无功调度模型,采用随机-分布鲁棒优化方法处理光伏的随机性,改善系统运行经济性和电压分布特性。刘科研等^[9]提出考虑多台区互联的中低压交直流混合配电网功率双层协同优化调度方法,以功率和电压作为耦合变量进行交互,采用多目标遗传算法和二阶锥优化的混合方法进行求解,降低网络损耗和电压波动。曾光辉等^[10]提出基于潮流计算的中压直流配电网协同优化调度方法,通过中压直流配电网潮流计算模型,分析配电网中的潮流分布情况。YU等^[11]提出一种基于区间线性规划的直流配电网中光伏储能最优配置方法,构建一个两级配置模型,以减少直流配电网中光伏电源的寿命损耗。程杉等^[12]针对高渗透率分布式可再生能源的不确定性、仿射算法结果的保守性,提出基于改进仿射算法的主动配电网区间优化调度模型,提升了计算效率与可靠性。林敏洪等^[13]提出接入光伏逆变器的鲁棒优化调度方法,以最小化总预期成本为目标,计算两阶段鲁棒优化目标函数,减少弃光费用和购电成本。张龙辉等^[14]提出配电网电压优化模型,利用海洋捕食者算法进行求解,得到光伏无功功率和电动汽车有功功率的最优配置。上述研究在平衡模型复杂

性与实用性方面取得了显著进展,但在多目标协同优化方面,模型性能仍有提升空间。

综上,针对有源配电网调度的研究主要涉及可再生能源和交直流配电网,采用的求解方法在复杂场景下存在求解效率不足、全局优化能力欠佳等问题,难以有效支撑相关配置目标的实现。因此,提出动态互利鹈鹕优化算法(dynamic mutualism pelican optimization algorithm, DMPOA),融合共生生物搜索(symbiotic organisms search, SOS)算法的互利阶段和动态加权技术,提高鹈鹕优化算法(pelican optimization algorithm, POA)的开发能力,增强种群协作和多样性,提高算法的收敛性。

1 有源配电网无功调度模型

多目标无功优化(multi-objective reactive power optimization, MORPO)径向配电系统的目标是使有功功率损耗和总电压变化最小化,改善系统电压分布^[15],使无功电源机组的总投资和运行成本同时满足等式约束和不等式约束。

1.1 目标函数

(1) 功率损耗最小化

配电系统功率损耗 P_L 为所有线路的损耗累加值,对应的目标函数为

$$f_1 = P_L = \sum_{k=1}^L G_k [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}], \quad (1)$$

式中: L 为支路数; G_k 为第 k 条线路的电导; $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ 为第 k 条线路两端母线的电压相角差,其中, θ_i 为终端母线 i 的电压相角, θ_j 为终端母线 j 的电压相角; V_i 为第 k 条支路端子母线 i 处的电压; V_j 为第 k 条支路端子母线 j 处的电压。

(2) 总电压变化最小化

系统最大负荷对电压剖面改善的影响见图1。径向配电系统的电压分布通过最小化总电压变化 V_T 得到改善。根据连续潮流定理^[16]可知,当运行于 AB 区间时,系统稳定;处于 AO 区间时,系统不稳定。 A 是系统临界稳定点, V_c 和 P_c 分别为电压和功率的临界值。通过总电压变化最小化,使系统运行点远离临界状态,提升电压稳定性,可表示为

$$f_2 = V_T = \sum_{i=1}^b |V_i - V_i^{\text{ref}}|, \quad (2)$$

式中: f_2 为目标函数2; b 为配电系统的负载母线数量; V_i 为第 i 条负载母线的实际电压(标么值); V_i^{ref} 为第 i 条负载母线的参考电压(标么值),取1.0。

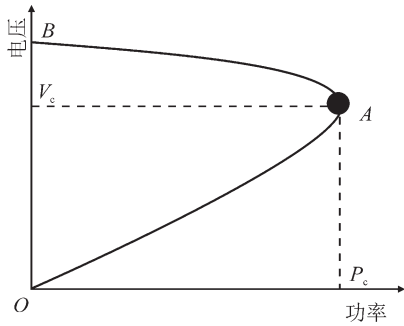


图1 系统最大负荷对电压剖面改善的影响

Fig.1 influence of system maximum loadability on voltage profile improvement

(3)无功电源机组总投资最小化

无功电源机组总投资 C_{RPS} 为

$$f_3 = C_{RPS} = \sum_{i=1}^N C_i |Q_i|, \quad (3)$$

式中: f_3 为目标函数3; N 为接入径向配电系统的无功机组数量; C_i 为第 i 台无功机组的单位无功功率投资成本; Q_i 为第 i 台无功机组的无功功率。

1.2 约束条件

(1) 等式约束

在无功优化问题^[17]中, 等式约束对应的功率平衡方程为

$$\begin{cases} P_{gi} + P_{di} - P_{li} = V_i \sum_{j=1}^{N_{bus}} V_j (G_k \cos \theta_{ij} + B_k \sin \theta_{ij}) \\ Q_{gi} + Q_{di} + Q_{ri} - Q_{li} = V_i \sum_{j=1}^{N_{bus}} V_j (G_k \sin \theta_{ij} + B_k \cos \theta_{ij}) \end{cases}, \quad (4)$$

式中: P_{gi}/Q_{gi} 为第 i 条母线上的有功/无功输出功率; P_{di}/Q_{di} 为第 i 条母线上分布式电源的有功/无功输出功率; P_{li}/Q_{li} 为第 i 条母线上有功/无功负载; Q_{ri} 为第 i 条母线无功机组的无功功率; N_{bus} 为配电系统的母线总数; G_k 、 B_k 为第 k 条线路的电导和电纳。

(2) 不等式约束

① 母线和馈线的传输容量约束

母线电压须保持在允许范围内, 即

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, \quad i=1, 2, \dots, b, \quad (5)$$

式中: V_i^{\min} 为第 i 条母线电压下限; V_i^{\max} 为第 i 条母线电压上限。

支路传输功率 S_k 不得超过其承载能力, 即

$$S_k \leq S_k^{\max}, \quad k=1, 2, \dots, L, \quad (6)$$

式中, S_k^{\max} 为第 k 支路的最大加载功率。

② 分布式发电和无功电源出力约束

分布式电源无功功率约束为

$$Q_{di}^{\min} \leq Q_{di} \leq Q_{di}^{\max}, \quad i=1, 2, \dots, M. \quad (7)$$

无功电源机组的无功功率约束为

$$Q_{ri}^{\min} \leq Q_{ri} \leq Q_{ri}^{\max}, \quad i=1, 2, \dots, N, \quad (8)$$

式 (7)、式 (8) 中: M 和 N 分别为分布式电源和

无功电源机组数量; $Q_{di}^{\min}/Q_{di}^{\max}$ 为第 i 条母线上分布式电源的最小/最大无功功率输出限值; $Q_{ri}^{\min}/Q_{ri}^{\max}$ 为第 i 条母线无功机组的最小/最大无功功率输出限值。

1.3 多目标优化问题

多目标无功调度 (MORPO) 可表示为

$$\min \mathbf{F} = [f_1 \quad f_2 \quad f_3]$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0 \\ h(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq 0 \\ u_j \geq v_j \geq l_j, j=1, 2, \dots, n \end{cases}, \quad (9)$$

式中: $g(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ 为等式约束; $h(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ 为不等式约束, 如式 (5)、式 (6); v_j 为第 j 个控制变量, u_j 和 l_j 为其上界和下界, 如式 (7)、式 (8)。

$$f_1 = P_L(\mathbf{x}, \mathbf{y}), f_2 = V_T(\mathbf{x}, \mathbf{y}), f_3 = C_{RPS}(\mathbf{x}, \mathbf{y}), \quad (10)$$

式中, 因变量 \mathbf{x} 、控制变量 \mathbf{y} 的表达式为

$$\mathbf{x}^T = [V_1, \dots, V_b, S_1, \dots, S_L], \quad (11)$$

$$\mathbf{y}^T = [Q_{d1}, Q_{d2}, \dots, Q_{dM}, Q_{r1}, \dots, Q_{rN}]. \quad (12)$$

所有变量边界范围内且满足不等式和等式约束的解, 构成控制变量的可行解空间。

为剔除违反约束的不可行解, 引入惩罚函数, 修正目标函数。修正或扩展后的目标函数为

$$F_1 = f_1 + \lambda_v \sum_{i=1}^b \Delta V_i + \lambda_s \sum_{k=1}^L \Delta S_k, \quad (13)$$

式中: λ_v 和 λ_s 为因变量违反界限的惩罚因子; ΔV_i 为第 i 条负载母线的电压约束违反量; ΔS_k 为第 k 支路的功率约束违反量。 ΔV_i 和 ΔS_k 分别表示为

$$\Delta V_i = \begin{cases} |V_i^{\min} - V_i| & V_i < V_i^{\min} \\ |V_i - V_i^{\max}| & V_i > V_i^{\max} \\ 0 & V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \end{cases}, \quad (14)$$

$$\Delta S_k = \begin{cases} (S_k - S_k^{\max})^2 & S_k > S_k^{\max} \\ 0 & S_k^{\min} \leq S_k \leq S_k^{\max} \end{cases}. \quad (15)$$

2 模型求解

2.1 鹈鹕优化算法 (POA)

POA 是一种基于自然灵感启发的随机优化算法^[18], 具有较强的空间搜索与利用能力, 能够有效求解复杂优化问题的全局最优解。该算法的设计灵感来源于鹈鹕的觅食行为, 鹈鹕在捕猎时通过协作定位猎物, 一旦识别出猎物的位置便同步俯冲并展开翅膀。借助这种行为迫使猎物上升至水面, 并移动到较浅的区域, 从而提升捕获效率。算法的核心流程分为探索阶段和开发阶段。

(1) 探索阶段

该阶段模拟鹈鹕锁定猎物后的位置转移行为,

通过全局范围的位置更新实现搜索空间的遍历。第 i 个鹈鹕在 j 维度的位置更新规则为

$$X_{i,j}^{new1} = \begin{cases} X_{i,j} + a(P - ZX_{i,j}) & F_p < F_i \\ X_{i,j} + a(X_i - P) & \text{其他} \end{cases}, \quad (16)$$

式中: $X_{i,j}$ 为第 i 个鹈鹕在 j 维度的当前位置; Z 是取值为 1 或 2 的随机数; $a \in (0, 1)$; P 为解空间中随机选取的猎物位置(备选解); F_p 、 F_i 分别为 P 和 $X_{i,j}$ 的目标函数值。

完成位置更新计算后,通过目标函数值判断是否接受新位置,规则为

$$X_i = \begin{cases} X_i^{new1} & F_i^{new1} < F_i \\ X_i & \text{其他} \end{cases}, \quad (17)$$

式中, F_i^{new1} 为新位置 X_i^{new1} 的目标函数值。

(2) 开发阶段

该阶段模拟鹈鹕协同围捕的行为,对局部优质区域进行精细化寻优,位置更新式为

$$X_{i,j}^{new2} = X_{i,j} + (1 - t/T)R(2a - 1)X_{i,j}, \quad (18)$$

式中: t 为当前迭代次数; T 为最大迭代次数; R 为常数,取 0.2。

同样通过目标函数值筛选最优解,即

$$X_i = \begin{cases} X_i^{new2} & F_i^{new2} < F_i \\ X_i & \text{其他} \end{cases}, \quad (19)$$

式中, F_i^{new2} 为新位置 X_i^{new2} 的目标函数值。

2.2 动态互利鹈鹕优化算法

传统 POA 存在无法探索潜在搜索空间且过早收敛问题。因此,提出一种动态互利鹈鹕优化算法(DMPOA),融合 POA 与 SOS 算法^[19]的互利阶段以提升 POA 的开发能力,同时引入动态加权技术,在迭代过程中自适应调整权重 w ,增强算法的收敛性。DMPOA 的流程见图 2。

(1) SOS 算法的互利阶段

个体 Y_i 是生态系统的第 i 个成员,个体 Y_j 被随机选择和 Y_i 进行交互,并一直保持着交互关系。 Y_i 和 Y_j 在交互后的新位置分别为

$$Y_i^L = Y_i + h(Y_{best} - I_1 R_{MV}), \quad (20)$$

$$Y_j^L = Y_j + h(Y_{best} - I_2 R_{MV}), \quad (21)$$

式中: $h \in (0, 1)$; Y_{best} 为最优个体; I_1 和 I_2 为利益因子,随机取 1 或 2; 互利向量 R_{MV} 为

$$R_{MV} = (Y_i + Y_j)/2. \quad (22)$$

POA 的核心不足在于探索阶段与开发阶段失衡,当开发阶段主导探索阶段时,算法过早收敛;如果探索阶段主导,算法将在无效解空间区域进行冗余搜索,难以得到最优解。针对这一问题,

提出一种智能杂交策略,融合 SOS 的互利阶段,优化 POA 的探索 and 开发阶段,改进 POA 的收敛性并提高求解精度。

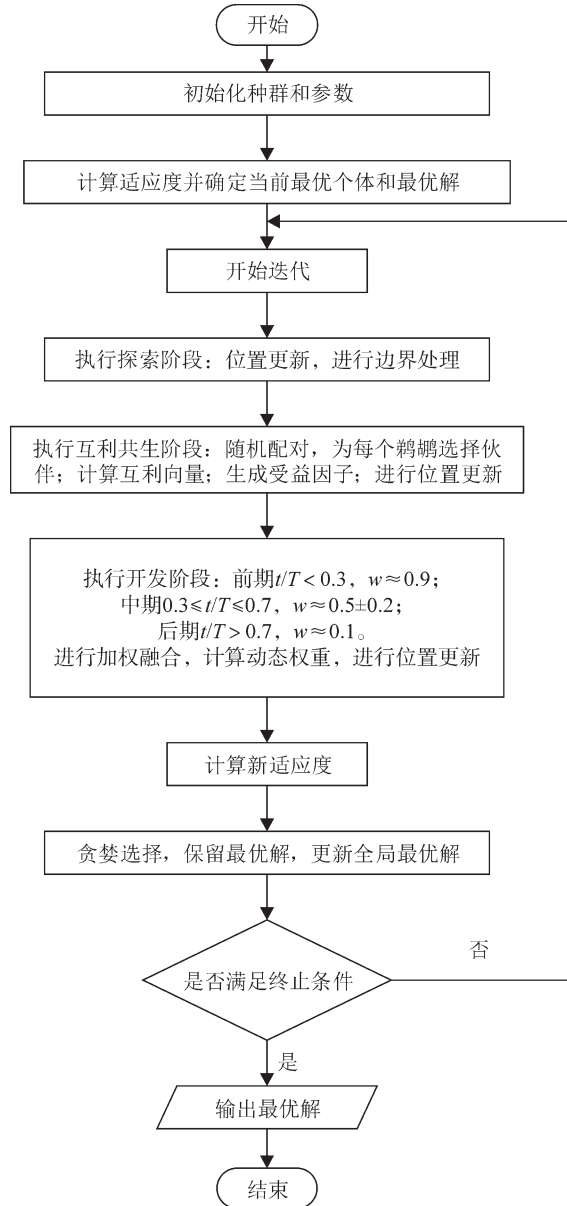


图 2 DMPOA 流程
Fig.2 DMPOA flow

(2) 动态加权技术

在开发阶段引入动态加权技术,使权重在每次迭代过程中自适应调整,更新后的位置为

$$X_{i,j}^{L2} = X_{i,j} + w(1 - t/T)(2a - 1)X_{i,j}, \quad (23)$$

式中: w 为权重,控制迭代过程中的搜索能力。

$$w = (w_0 - w)(t - T)/(1 - T) + w_\infty, \quad (24)$$

式中: w_0 和 w_∞ 分别为权重 w 的初始值和最终值。

$$w_0 = (u - l)/4, \quad (25)$$

$$w_\infty = w/100, \quad (26)$$

式中, u 、 l 为上、下边界。

迭代初期 w 较大, 有利于鹈鹕的随机运动, 增强算法的全局探索能力, 确保充分覆盖整个搜索空间; 迭代后期 w 减小, 从而减小最优解周围的搜索区域。

3 算例分析

将DMPOA算法应用于无功调度模型的多目标求解, 通过调整控制变量(分布式电源和无功电源的输出), 求解3种方案下的最小化目标函数值。选取IEEE 69径向配电网为测试对象, 并在系统中部署分布式发电和无功电源单元。为验证DMPOA的有效性, 选取3类经典多目标优化算法进行对比分析, 对比算法为带精英策略的非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)、多目标粒子群算法(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)^[20]和POA。共设计3种对比方案。

方案1: P_L 和 V_T 最小化, 适用于电压稳定性要求较高的配电网场景。

方案2: P_L 和 C_{RPS} 最小化, 适用于投资受限的配电网改造场景。

方案3: P_L 、 V_T 和 C_{RPS} 最小化, 用于城市智能电网的多维度优化。

将MORPO问题转换为单目标优化问题, 通过对归一化后的子目标函数加权求和, 得到单目标函数 f_1' 、 f_2' 和 f_3' 。

方案1的目标函数为

$$\min f_1' = w'P_L' + (1 - w')V_T' \quad (27)$$

方案2的目标函数为

$$\min f_2' = w''P_L' + (1 - w'')C_{RPS}' \quad (28)$$

方案3的目标函数为

$$\min f_3' = w_1P_L' + w_2V_T' + w_3C_{RPS}' \quad (29)$$

式(27)~式(29)中, w' 、 w'' 为权重, w' 、 $w'' \in (0, 1)$ 。在式(29)中, w_1 、 w_2 和 w_3 分别用0.33、0.33和0.34估计。

假设控制变量连续, 在径向配电系统中各负载母线电压标幺值的下限和上限分别为0.95和1.05, 偏离该范围的解都会通过式(14)和式(15)计算惩罚值。实验在“Core i5处理器+8GB内存”的硬件环境中通过Python完成。

在IEEE 69总线径向配电系统中部署设备, 于11、18和61号母线各安装1个兼具有功和无功输出的分布式电源; 安装3个无功电源, 放置在21、61和64号母线上, 控制变量限值见表1, 系统节点拓扑见图3。该系统未部署分布式电源时, P_L 为224.98 kW、 V_T 为1.836 8(标幺值), 部署后节点电压幅值和功率损耗见图4和图5, 电压剖面远离图1中的临界不稳定区, 电压幅值总体稳定且更趋近于1(标幺值), 功率损耗总体更趋近于0。DMPOA种群大小 N 取100, 最大迭代次数取100。

表1 控制变量限值
Tab.1 control variables limits

变量	限值/kvar
$Q_{d11}^{\min}/Q_{d18}^{\min}/Q_{d61}^{\min}$	0
$Q_{d11}^{\max}/Q_{d18}^{\max}$	800
Q_{d61}^{\max}	1 800
$Q_{r21}^{\min}/Q_{r61}^{\min}/Q_{r64}^{\min}$	0
$Q_{r21}^{\max}/Q_{r61}^{\max}$	450
Q_{r64}^{\max}	1 200

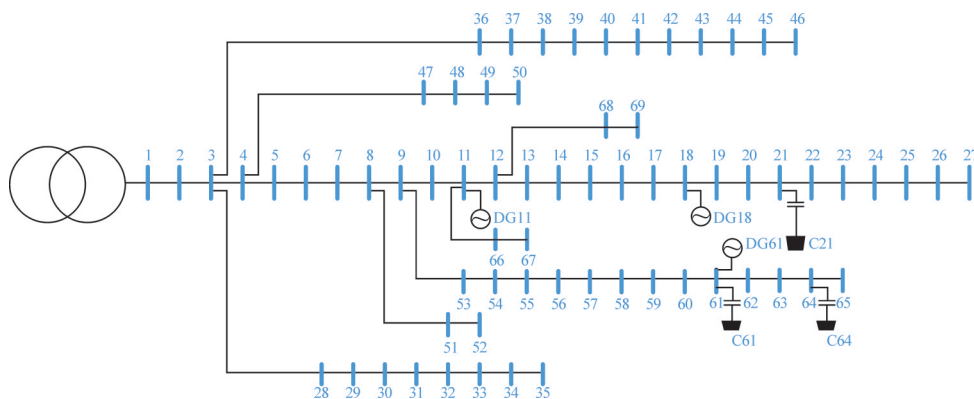


图3 IEEE 69总线系统节点

Fig.3 IEEE 69 bus system nodes

在3种优化方案下, 将DMPOA与其他3种算法的帕累托最优前沿和收敛曲线进行对比, 结果

见图6、图7, 可见DMPOA的帕累托最优前沿整体效果良好且收敛性较好。目标函数值与控制变

量见表2~表4, DMPOA 求解得到的 P_L 、 V_T 和 C_{RPS} 均优于其他3种算法, 证明了DMPOA 的有效性。

以方案3为例, 相较于未部署分布式电源和无功电源机组的基准状态, P_L 降低了96.7%, V_T 降低

了93.56%, 体现了优化模型与DMPOA 算法的协同优化能力。需要说明的是, 实际改善效果因配电网的网络结构、参数与分布式电源渗透率的影响而存在差异。

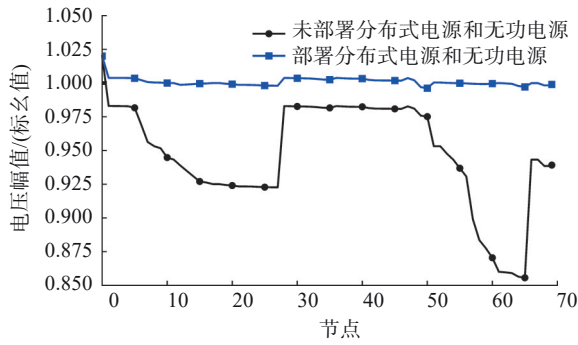


图4 节点电压

Fig.4 node voltage

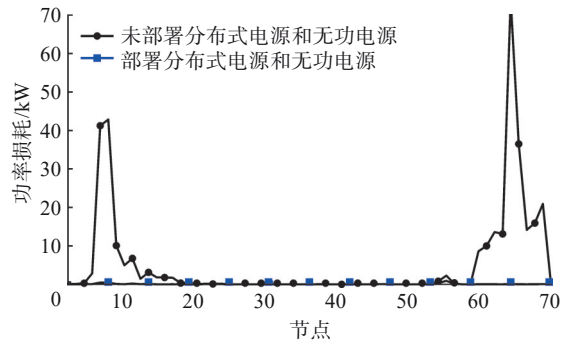


图5 节点功率损耗

Fig.5 node power loss

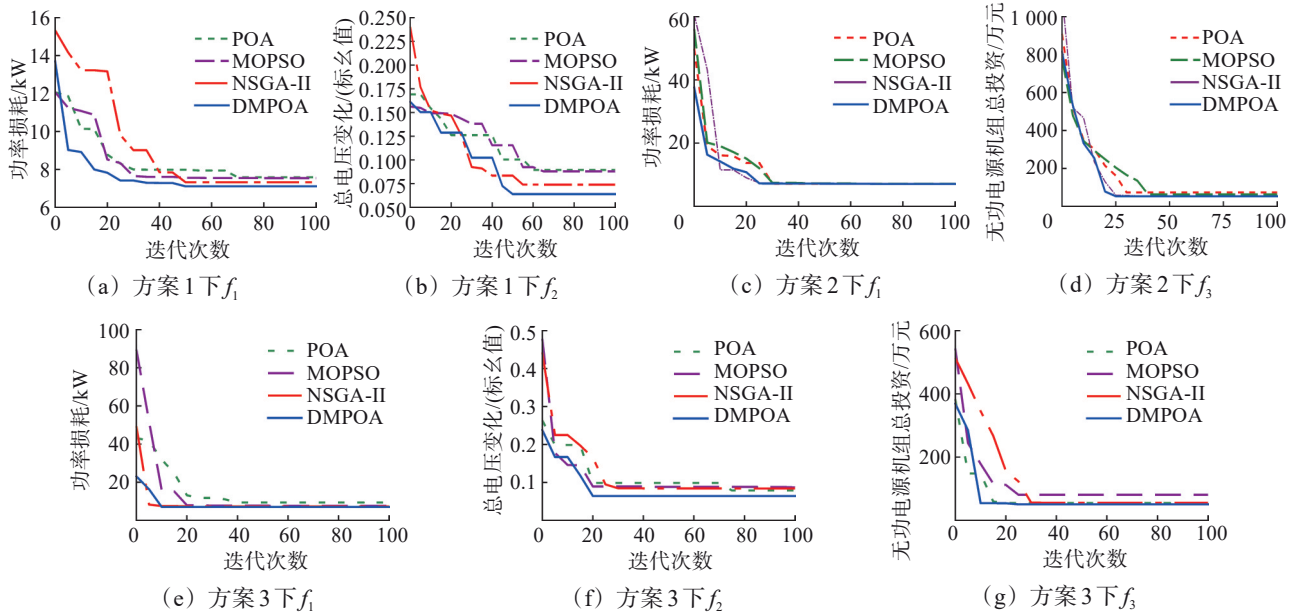


图6 不同算法的收敛曲线

Fig.6 convergence curve of different algorithms

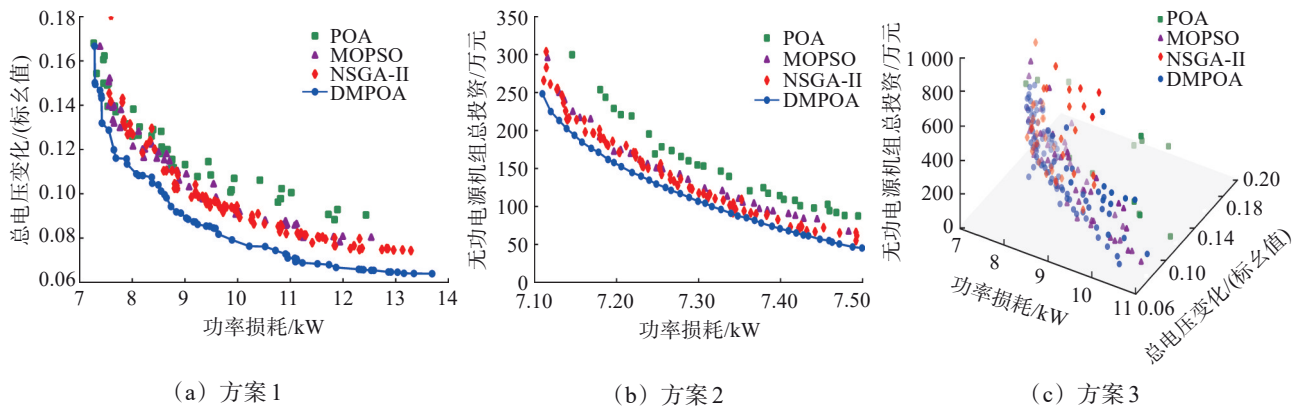


图7 不同算法的帕累托前沿

Fig.7 Pareto front of different algorithms

表 2 目标函数值与控制变量(方案 1)
Tab.2 objective values and control variables (case 1)

算法	控制变量/kvar						目标函数	
	Q_{d11}	Q_{d18}	Q_{d61}	Q_{r21}	Q_{r61}	Q_{r64}	P_L/kW	$V_T(\text{标么值})$
DMPOA	429.196 3	380.405 0	1 661.436 9	105.268 4	624.018 1	239.136 4	7.687 7	0.116 0
POA	408.384 8	379.458 9	1 637.691 4	50.738 7	1 106.478 2	450.003 2	8.001 0	0.126 0
MOPSO	389.884 8	378.751 5	1 611.104 2	201.764 6	1 087.150 9	94.359 8	7.782 6	0.138 0
NSGA-II	427.992 6	350.835 0	1 639.620 6	11.186 0	1 108.321 0	173.289 4	7.810 0	0.141 3

表 3 目标函数值与控制变量(方案 2)
Tab.3 objective values and control variables (case 2)

算法	控制变量/kvar						目标函数	
	Q_{d11}	Q_{d18}	Q_{d61}	Q_{r21}	Q_{r61}	Q_{r64}	P_L/kW	$C_{RPS}/\text{万元}$
DMPOA	303.547 9	378.007 9	1 635.625 9	91.010 2	1.678 3	163.506 9	7.129 9	213.252 3
POA	279.556 4	306.766 4	1 567.053 5	89.553 2	2.112 0	175.302 8	7.186 5	243.840 5
MOPSO	318.354 2	381.310 5	1 636.997 6	91.467 0	2.157 1	173.376 6	7.136 4	240.529 2
NSGA-II	283.606 8	379.870 0	1 628.509 7	83.460 2	1.333 7	177.102 9	7.137 9	225.120 0

表 4 目标函数值与控制变量(方案 3)
Tab.4 objective values and control variables (case 3)

算法	控制变量/kvar						目标函数		
	Q_{d11}	Q_{d18}	Q_{d61}	Q_{r21}	Q_{r61}	Q_{r64}	P_L/kW	$V_T(\text{标么值})$	$C_{RPS}/\text{万元}$
DMPOA	362.240 9	374.296 7	1 656.162 4	67.172 6	39.327 7	8.300 3	7.610 7	0.117 8	84.340 4
POA	311.603 8	451.690 4	1 604.590 2	290.622 8	34.152 7	206.635 3	9.844 2	0.138 9	412.615 8
MOPSO	384.134 3	396.576 5	1 660.910 0	250.432 0	40.034 1	161.338 1	7.734 4	0.128 1	146.163 4
NSGA-II	430.357 1	378.112 5	1 644.774 8	199.404 9	40.672 9	240.057 3	7.680 2	0.118 3	375.697 2

4 结论

针对有源配电网无功调度问题,建立了以有功损耗、无功电源机组总投资和总电压偏差最小化为目标的多目标优化模型,旨在实现系统功率平衡、效率提升及成本控制。为求解该MORPO问题,提出动态互利鹈鹕优化算法(DMPOA),通过引入互利共生机制和动态加权策略,平衡了算法的探索与开发能力,增强了收敛性能。以IEEE 69节点系统为测试对象开展多方案仿真分析,将DMPOA与NSGA-II、MOPSO和POA对比,结果表明,DMPOA能获得分布更均匀的帕累托最优解,在优化目标的同时维持系统稳定性。

DMPOA在求解多目标优化问题时仍存在收敛速度受初值影响和参数设置依赖经验等缺点。未来可通过自适应参数与多阶段权重机制,进一步提升算法性能。

参考文献(References):

- [1] 张鸿宇,黄晓丹,张达,等.加速能源转型的经济社会效益评估[J].中国科学院院刊,2021,36(9):1039-1048.
ZHANG Hongyu, HUANG Xiaodan, ZHANG Da, et al. Evaluating economic and social benefits of accelerated energy transition[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(9): 1039-1048.
- [2] 高锋阳,乔垚,杜强,等.考虑光伏出力相关性的配电网动态无功

优化[J].太阳能学报,2018,39(1):101-109.

GAO Fengyang, QIAO Yao, DU Qiang, et al. Dynamic reactive power optimization of distribution network considering correlated photovoltaic power output[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2018, 39(1): 101-109.

- [3] 陈倩,王维庆,王海云,等.含分布式电源的配电网动态无功补偿优化策略研究[J].太阳能学报,2023,44(1):525-535.

CHEN Qian, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Research on dynamic reactive power compensation optimization strategy of distribution network with distributed generation[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(1): 525-535.

- [4] QIAN J, WANG P, PU C G, et al. Application of modified beetle antennae search algorithm and BP power flow prediction model on multi-objective optimal active power dispatch[J]. Applied Soft Computing, 2021, 113: 108027.

- [5] 王秀茹,刘刚,黄华峰,等.考虑分布式电源的配电网无功调度和储能优化方法[J].电力科学与技术学报,2022,37(4):134-142,208.

WANG Xiuru, LIU Gang, HUANG Huafeng, et al. Reactive power dispatching and energy storage optimization for distribution network with distributed power resources[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4): 134-142, 208.

- [6] 董海,曹晓兰.基于策略驱动的混合能源微电网动态调度[J].太阳能学报,2023,44(7):22-29.

DONG Hai, CAO Xiaolan. Dynamic dispatching of hybrid energy microgrids based on strategy-driven[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(7): 22-29.

- [7] 武晓滕, 袁榕泽, 李英量, 等. 基于新冠病毒群体免疫算法的有源配电网优化调度[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(12): 2692-2702.
WU Xiaomeng, YUAN Rongze, LI Yingliang, et al. Optimized scheduling of distribution network with distributed generation based on coronavirus herd immunity optimizer algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(12): 2692-2702.
- [8] 姜惠兰, 肖瑞. 提高系统暂态稳定性的 VSC-HVDC 有功无功联合附加控制策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(8): 138-144.
JIANG Huilan, XIAO Rui. Combined active and reactive additional control strategy of VSC-HVDC for improving system transient stability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(8): 138-144.
- [9] 刘科研, 盛万兴, 詹惠瑜, 等. 考虑多台区互联的中低压交直流混合配电网双层协同优化调度方法[J]. 电力建设, 2024, 45(1): 33-44.
LIU Keyan, SHENG Wanxing, ZHAN Huiyu, et al. Bi-level optimization scheduling of mid-low-voltage AC/DC hybrid distribution network considering interconnection between networks [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(1): 33-44.
- [10] 曾光辉, 叶容慧, 刘伟斌, 等. 基于潮流计算的中压直流配电网协同优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(9): 98-104.
ZENG Guanghui, YE Ronghui, LIU Weibin, et al. The cooperative optimal dispatching of the medium voltage DC distribution network based on power flow calculation[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(9): 98-104.
- [11] YU D, TANG R, PAN L Z. Optimal allocation of photovoltaic energy storage in DC distribution network based on interval linear programming[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 85: 110981.
- [12] 程杉, 左先旺, 杨堃, 等. 基于改进仿射算法的主动配电网区间调度[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(1): 40-48.
CHENG Shan, ZUO Xianwang, YANG Kun, et al. Interval scheduling of active distribution network based on improved affine arithmetic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(1): 40-48.
- [13] 林敏洪, 丘冠新, 张勇, 等. 两阶段鲁棒优化调度的光伏逆变器集中接入主动配电网研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(9): 113-119.
LIN Minhong, QIU Guanxin, ZHANG Yong, et al. Research on centralized access of photovoltaic inverters to active distribution network based on two-stage robust optimal scheduling[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(9): 113-119.
- [14] 张龙辉, 任丽佳. 基于 MPA 的含电动汽车的配电网电压优化研究[J]. 现代电子技术, 2025, 48(20): 165-170.
ZHANG Longhui, REN Lijia. Research on MPA-based distribution network voltage optimization with electric vehicle[J]. Modern Electronic Technique, 2025, 48(20): 165-170.
- [15] 史可鉴, 代子阔, 王刚, 等. 考虑分布式电源接入与综合运行成本的配电网无功优化[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2023, 42(3):339-344.
SHI Kejian, DAI Zikuo, WANG Gang, et al. Reactive power optimization for distribution system with distribution generators considering synthetic operation cost[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2023, 42(3):339-344.
- [16] 赵晋泉, 汤奕, 党杰, 等. 计及高比例新能源多种控制方式及运行约束的连续潮流[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(16):123-131.
ZHAO Jinquan, TANG Yi, DANG Jie, et al. Continuous power flow considering multiple control modes and operational constraints of high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(16):123-131.
- [17] 单亚峰, 杜天霖, 金岑, 等. 改进快速群搜索算法在配电网无功优化中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2023, 42(2):228-234.
SHAN Yafeng, DU Tianlin, JIN Cen, et al. Application of improved fast group search algorithm in reactive power optimization of distribution network[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2023, 42(2):228-234.
- [18] TROJOVSKÝ P, DEHGhani M. Pelican optimization algorithm: a novel nature-inspired algorithm for engineering applications[J]. Sensors, 2022, 22(3): 855.
- [19] 谢学渊, 刘潇潇, 李超, 等. 考虑分布式电源和电动汽车集群调度的配电网重构[J]. 中国电力, 2023, 56(1):119-125.
XIE Xueyuan, LIU Xiaoxiao, LI Chao, et al. Distribution network reconfiguration considering distributed generation and electric vehicle cluster scheduling[J]. Electric Power, 2023, 56(1):119-125.
- [20] 刘巍巍, 姜珊, 祁朔, 等. 基于改进细菌觅食算法的两阶段选址-路径规划[J]. 沈阳工业大学学报, 2025, 47(2):238-249.
LIU Weiwei, JIANG Shan, QI Shuo, et al. Two-stage location-path planning based on improved bacterial foraging algorithm[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2025, 47(2): 238-249.